

BSO 晶体空间电光、光电导特性的实验研究

董孝义 盛秋琴 张建忠

(天津南开大学现代光学研究所)

Experimental research on spatial E-O effect and photoconductive effect in BSO crystals

Dong Xiaoyi, Sheng Qiuqin, Zhang Jiansong

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin)

提要: 本文提出了对 BSO 晶体空间电光与光电导特性进行测量的实验方法, 给出了对 BSO 晶体样品的测量结果。

关键词: BSO 晶体, 空间电光效应, 光电导效应

一、引言

BSO ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 硅酸铋) 晶体具有显著的电光特性和光电导特性, 这些特性的同时存在使 BSO 晶体成为研制实时光调制器 (SLM)^[1]、非相干-相干变换器 (ICC)^[2]、普克耳读出光调制器 (PROM)^[3] 的重要光学材料。BSO 晶体属立方晶系 23 点群, 是 Bi_2O_3 与 SiO_2 的化合物, 光学窗口宽、透过性能好, 可拉制出大尺寸单晶, 因此被认为是制作空间光学功能性器件的理想晶体, 在光信息处理、光通信、光计算等方面有着重要应用^[4]。我们对国产 BSO 晶体的电光特性、光电导特性进行了实验研究, 并侧重于测量其空间特性, 以使实验结果及其分析更有实际意义。

二、BSO 晶体的特性

2.1 BSO 晶体的光电导效应

BSO 晶体有显著的光电导效应, 在无光照时, 其电导率 σ_d 很低 ($\sigma_d \approx 2 \times 10^{-15} / \text{m} \cdot \Omega$); 在有光照时光生载流子使 σ 显著增大, 已经证明^[5], 这种光生载流子主要是导带中被电离的施主中心提供的自由电子, 因此有

$$\sigma \approx \sigma_e = e \mu_e n_e, \quad (1)$$

其中 μ_e 、 n_e 代表自由电子的迁移率和浓度。在有限面元 ΔS 内可认为光生载流子是均匀的, 由光电导效应引起的光电流可写成

$$i = e \mu_e n_e \Delta S \quad (2)$$

作为实时空间光器件, BSO 光电导的响应时间是最重要的参数之一。由于光强信号 $I(t)$

收稿日期: 1987 年 8 月 1 日。

(一般为光学图像信号)和 $n_e(t)$ 直接相关,因此响应时间是器件工作频率的主要限制。

为简化分析,只考虑一种施主能级情况。令 N_D 和 N_T^+ 分别为施主密度和捕获中心密度, β 和 γ 分别为光生载流子的激发速率和复合速率,于是可写出^[9]

$$\frac{dn(t)}{dt} = \beta I(t) (N_D - N_T^+) - \gamma n(t) N_T^+ \quad (3)$$

在实际应用中均属弱辐照情况,即有 $N_T^+ \ll N_D$, $N_T^+ = \text{常数}$,所以(3)式近似为

$$\begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} &= \beta N_D I(t) - \gamma n(t) N_T^+ \\ &= \beta N_D I(t) - n(t)/T_R \quad (4) \end{aligned}$$

式中 $T_R = (\gamma N_T^+)^{-1}$ 为复合时间。如果 $I(t)$ 为一矩形光脉冲,宽度为 T_P ,并令 $T_P \gg T_R$,即光脉冲持续时间内光生载流子发生和复合为即时进行的,因此方程(4)可近似为

$$n(t) \simeq T_R \beta N_D I(t) \quad (5)$$

说明光电流信号 $i(t) = en(t) \Delta S$ 基本上是光强信号 $I(t)$ 的复现。

上述情况只适用于面元 ΔS 内的光电导过程。一般讲,当光强信号为 $I(t, x, y)$,即实时图像信号时,不同面元内光生载流子浓度不同,因此会产生面元范围间的扩散,使器件响应时间参数的测量复杂化。为解决这个问题,可使用均匀辐射,也可使用 $L \ll S^{1/2}$ 器件(S 为 BSO 晶体的通过面积, L 为电极间距离)。在这种情况下

$$i(t) \simeq \sum_n en_n(t) \Delta S_n \simeq T_R \beta N_D S I(t) \quad (6)$$

显然, $i(t) \propto I(t)$, 这表明,在实际应用中多属于线性光电导情况,或者说,可从对 $i(t)$ 的测量中直接得到有关光电导特性的有关信息。

在光照开始后,由于光电导的时间特性,光电流不会即时达到定态光强 I_0 对应的值。如令 $t=0$, $n(t)=0$, 则从(4)式不难求出

$$n(t) = T_R \beta N_D I_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_R}\right) \right] \quad (7)$$

在光照去除后,光电流也不会即时降至零,同

样可求得

$$n(t) = T_R \beta N_D I_0 \exp\left(-\frac{t}{T_R}\right) \quad (8)$$

(7)式给出了光电流的上升状况,(8)式给出了光电流的下降状况,上升与下降速度均与 T_R 相关,因此,一般定义响应时间为

$$T_r = T_R \cdot \ln 2。$$

由(7)、(8)式可以看出, T_r 代表 $n(t)$ 从零上升到 $I_0/2$ 对应的值时,或从 I_0 对应的值下降到 $I_0/2$ 对应的值时所需要的时间,这个时间的大小,只由 BSO 晶体材料的复合时间,即光生载流子的寿命确定。

2.2 BSO 的电光特性

在 BSO 空间光器件的应用中主要利用其线性电光(即泡克耳)效应。对于 23 点群,不为零的线性电光系数只有三个,而且数值相等,即电光系数

$$r_{41} = r_{52} = r_{63} \simeq 5 \times 10^{-12} \text{cm/V}^{[11]}$$

在这种情况下可利用的电光构形有三种,即

$$\text{a) } E \perp (001) \text{ 面, } E_x = E_y = 0, E_z = E。$$

此时得到的电感应主轴分别为 x' 和 y' , x' 为慢轴, y' 为快轴。因此可产生的相位延迟量有

$$\Gamma_z = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{41} V, \quad (\text{纵向运用}) \quad (9)$$

和

$$\Gamma_{xy} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{l}{d} n_0^3 r_{41} V。 \quad (\text{横向运用}) \quad (10)$$

$$\text{b) } E \perp (110) \text{ 面,}$$

$$E_x = E_y = \frac{E}{\sqrt{2}}, E_z = 0。$$

此时同构形(a),电感应主轴分别为 x' 和 y' , x' 为慢轴, y' 为快轴。可产生的最大相位延迟为

$$\Gamma_{\max} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{l}{d} n_0^3 r_{41} V。 \quad (11)$$

$$\text{c) } E \perp (111) \text{ 面,}$$

$$E_x = E_y = E_z = \frac{E}{\sqrt{3}}。$$

此时得到的电感应主轴分别为 x' 、 y' 和 z' ,其中 x' 与 y' 同,均为慢轴, z' 为快轴。因此可

得到的相位延迟为

$$\Gamma = \frac{\sqrt{3} \pi}{\lambda} \frac{l}{d} n_0^3 r_{41} V \quad (12)$$

在三种电光构形中,如作为振幅调制使用,均可写成

$$I_0 = I_i \sin(\Gamma/2) \quad (13)$$

其中 I_0 和 I_i 分别为透射(输出)光强和入射(输入)光强。

作为 PROM 和 ICC 使用的 BSO 晶体,多运用于第一种构形,作为 SLM 使用的 BSO 晶体也可运用第二种构形^[4]。

三、测量方法和测量结果

被测 BSO 晶体如图 1 所示,厚度 $L=0.8\text{mm}$, L 沿晶体的 $[001]$ 方向,晶体的透光面 $S=35 \times 35\text{mm}^2$,为了测量其光电导特性和电光特性,在 S 面上镀有透明电极。

3.1 光电导特性的测量

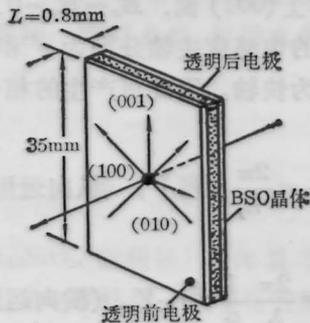


图 1

测量装置如图 2 所示。由 Ar^+ 激光器输出的 $\lambda=514.5\text{nm}$ (或 488.0nm) 的激光束,经光学系统匀化后,由频率可调的斩波器斩波,并射入 BSO 晶体。通过晶体的透射光由快响应光电倍增检测^[5],并将其输出作为测量比较信号输给示波器 y_2 轴和触发输入端。透明电极上加上 $1\sim 2\text{kV}$ 直流电压,由光电导效应产生的光电流经取样电阻 R_0 ,将相应的电压信号输给示波器的 y_1 端,以便与光激励信号(y_2)进行比较,确定光电导的响应特性。为了保证在测量过程中 BSO 晶体内电

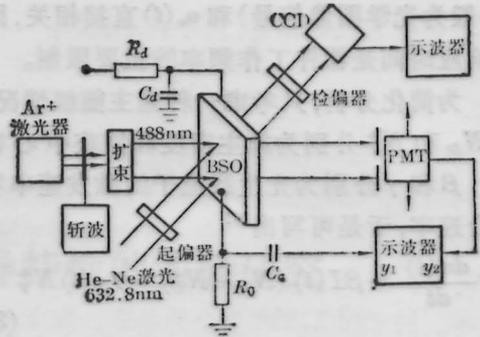


图 2

场的均匀性,且为常数,我们还用一束氦-氖激光束辐照 BSO 晶体,并插入正交偏振器,用 CCD 探测器监视电光效应。

测量结果如下:

a) 响应时间的测定。如图 3 所示,其中 (a) 为光电流信号与斩波光信号的示波图, (b) 为 CCD 探测器的输出信号。CCD 的输出表明,在测量中 BSO 晶体中的电场是均匀的,且保持为一常数。因此,我们可从图 3(a) 的波形上测定出 BSO 晶体光电导效应的响应时间 τ ,即

$$\tau = (\tau_1^2 - \tau_2^2 - \tau_3^2)^{1/2} \quad (14)$$

其中 τ_1 和 τ_2 分别为光电流与斩波光信号波形的上升时间; τ_3 为 R_0C 电路引入的时间常

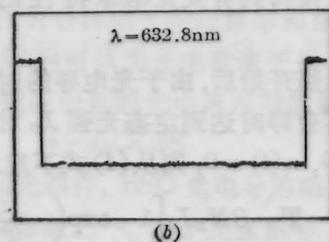
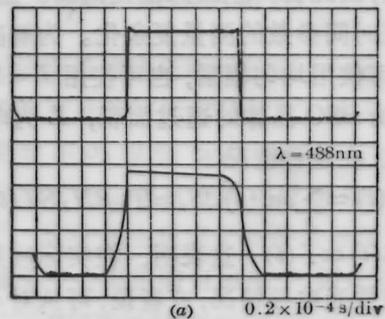


图 3

数,其中 C 为光电流测量回路的分布电容。将测量到的 τ_1, τ_2, τ_3 值代入(14)式,最后得到 $\tau = 1.9 \times 10^{-5} \text{ s}$, 此值稍高于文献[5]给出的值。实验结果还证明,上述分析(如第(6)式)基本上是合理的。

b) 光电导效应的空间均匀性。利用同一测量装置,将未经扩束的激光直接照射到BSO晶体表面的一局部位置,并通过精密调节架调节晶体位置,重复上述测量,分别记下对应不同位置的光电流信号幅度,即可作出光电流-晶体表面位置坐标关系曲线。用此曲线评定光电导效应的均匀性。图4是由几次测量结果绘出的平均曲线。可以看出,光电导效应基本上是均匀的,只是在晶体边缘部分,光电导稍高一些。

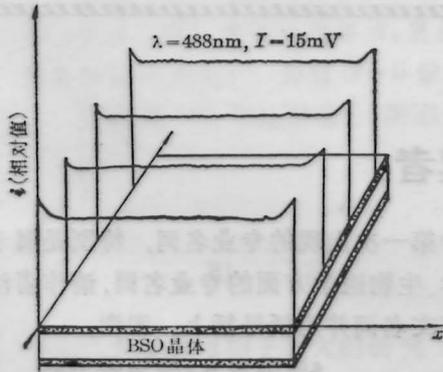


图 4

c) 光电流-晶体电压关系,给定一光强 I_1 ,改变加在晶体上的电压值 V ,测出相应的光电流幅值 i ,即作出 $i \sim V$ 关系曲线;光强改变为 I_2, I_3, \dots 重复上述测量即可作出一组 $i \sim V$ 曲线,曲线的斜率即为相应的光电导值。图5是根据测量结果画出的一组曲线。可以看出,给定的条件下, $i \sim V$ 为线性关系,即光电导为常数,大小与光强有关。这一结果与上述理论分析是吻合的。

3.2 电光效应的测量

参考图2,关掉 Ar^+ 激光,即可用 He-Ne 激光完成对 BSO 晶体的电光特性的测量。

a) 半波电压测量。用常规测量方法^[9]

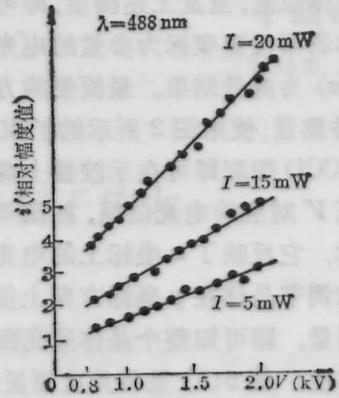


图 5

对 BSO 晶体的半波电压 V_π 进行了测量,测量结果 $V_\pi = 3.90 \text{ kV}$ 。由图1可看出,这种结构属于2.2节(a)种电光构形的纵向运用,因此可从(9)式计算出半波电压(取 $n_0 = 2.5$, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $r_{41} = 5 \times 10^{-12} \text{ V/m}$),计算结果与测量结果基本相符。

b) 电光效应的空间均匀性。可用两种方法测定电光效应的均匀性。首先,象测定光电导那样,让 He-Ne 激光照射到 BSO 晶体表面某一局部位置上,并在电极两端加入三角电压信号 $V(t)$,用光电倍增管接收,即可通过示波器观测到电光调制曲线。用调节

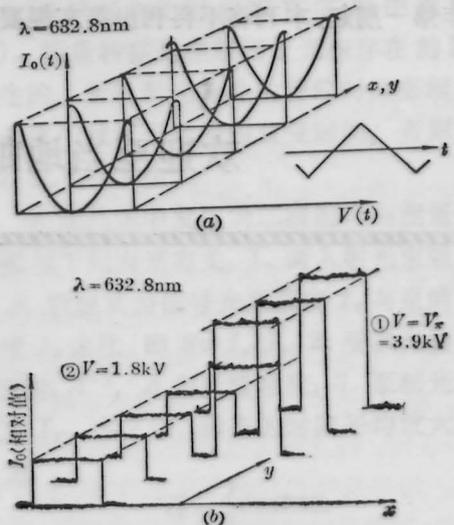


图 6

架改变晶体位置,重复上述测量,即可作出一组以晶体表面位置坐标为参量的电光调制曲线,图 6(a) 为测量结果。最简便的方法是用 CCD 器件测量,使用图 2 所示的扩束 He-Ne 激光,用 CCD 探测即可在示波器上观测到与外加电压 V 对应的电光曲线,如图 3(b)、图 6(b) 所示,它反映了 x 坐标上的电光效应均匀性。如调节晶体在 y 坐标方向上位置,重复上述测量,即可知整个晶体通光面的电光效应均匀性。图 6(b) 是将几次测量结果的示波图描绘在以 y 坐标为参量的电光曲线族②。从测量结果不难看出,该 BSO 晶体在线性区域 (V 在 1.5~2kV 范围) 内电光效应的空间均匀性极好。图中曲线族①是外加电压 $V=V_{\pi}$ 时的情况,显然,它反映着

BSO 晶体未消光时的透过特性,测量结果表明,这种晶体的透过率也是非常均匀的。

电子工业部 26 研究所王德龙同志提供了 BSO 单晶,杨华和张自力同学参加了部分测量工作,对此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 F. Holler and H. J. Tiziani, *Opt. Commun.*, **58**(1), 20(1986)
- 2 西原浩,应用物理,**49**, 479(1980)
- 3 T. Minemoto *et al.*, *Appl. Opt.*, **25**(6), 948(1986)
- 4 峰本工, *O. plus E*, (86), 81(1987)
- 5 S. Hou *et al.*, *Appl. Phys.*, **44**, 2652(1973)
- 6 G. Lesaux *et al.*, *Opt. Commun.*, **57**(3), 166(1986)
- 7 R. E. Aldrich *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **42**, 493(1971)
- 8 董孝义 *et al.*, 中国激光,**8**(2), 13(1981)
- 9 盛秋琴 *et al.*, 应用激光,**6**(3), 123(1986)

告作者·读者

本刊自 1986 年第一期起已由美国物理学会和美国光学学会全文翻译成英文出版,现已向世界各地发行了两年多,广大读者已阅读到本刊的英文版。为此,从 1989 年第一期起,本刊将不再刊出英文提要。对

文中第一次出现的专业名词,特别是属于化学、生物医学方面的专业名词,请作者注明英文名词并用括号括上。谢谢。

《中国激光》编辑委员会

1988.11

欢迎至当地邮局订阅《中国激光》!